

E-746



ОБЪЕДИНЕННЫЙ ИНСТИТУТ ЯДЕРНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ
ЛАБОРАТОРИЯ ЯДЕРНЫХ ПРОБЛЕМ

2788

П.Ф. Ермолов

**ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ
МЮ - АТОМНЫХ ПРОЦЕССОВ
В ГАЗООБРАЗНОМ ВОДОРОДЕ**

**Автореферат диссертации на соискание ученой степени
кандидата физико-математических наук**

**Научный руководитель -
доктор физико-математических наук
профессор** **В.П. Джелепов**

Дубна 1966

2766

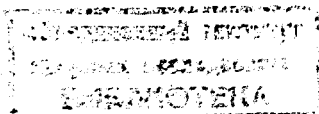
П.Ф. Ермолов

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ
МЮ - АТОМНЫХ ПРОЦЕССОВ
В ГАЗООБРАЗНОМ ВОДОРОДЕ

Автореферат диссертации на соискание ученой степени
кандидата физико-математических наук

Научный руководитель -
доктор физико-математических наук
профессор
В.П. Желепов

Дубна 1966



367269,

В диссертации обобщены результаты экспериментального исследования свойств мюонных атомов и молекул в газообразном водороде и дейтерии, проведенного на синхротроне Лаборатории ядерных проблем Объединенного института ядерных исследований в 1959-1964 гг.

Материал диссертации основан на работах^{/1-8/}, опубликованных в ЖЭТФе, Nuovo Cimento, Nuclear Physics, препринтах ОИЯИ и в трудах международной конференции по физике высоких энергий в Женеве (1962 г.). Результаты более поздних работ докладывались на международных конференциях в Дубне (1964 г.), Париже (1964 г.) и Оксфорде (1965 г.) и опубликованы в трудах этих конференций^{/9-11/}.

Эксперименты были проведены автором совместно с С.Г. Басиладзе, В.П. Дзельцовым, Ю.В. Катышевым, Е.А. Куширенко, В.И. Москалевым, К.О. Оганесяном, В.В. Фильченковым, М. Фримлом.

I

Интерес к экспериментальному и теоретическому изучению свойств μ -атомов водорода связан с несколькими причинами.

1. В силу малых размеров и электронейтральности μ -атом водорода является своеобразным квантово-механическим объектом, свойства которого существенно отличаются от свойств обычных атомов. Так, сечения рассеяния μ -атомов являются промежуточными между атомными и ядерными сечениями; μ -молекулы водорода могут иметь только несколько связанных уровней; появляется возможность изучения резонансных уровней; своеобразны механизмы образования μ -молекул; ввиду малой скорости μ -атомов в ряде случаев имеется сильная спиновая зависимость взаимодействия, и с участием μ -атомов протекает ряд необратимых процессов.

2. В 1957 г. Альварецем с сотрудниками был обнаружен катализ отрицательными мюонами ядерных реакций синтеза изотопов водорода^{/12/}. Возможность такого процесса была предсказана ранее Ф. Франком и независимо от него А.Д. Сахаровым и Я.Б. Зельдовичем^{/13/}. Несмотря на то, что сразу после опытов Альвареца стало по-

нятно, что μ -катализ не может найти технического применения в качестве источника энергии, тем не менее, изучение этого явления представляет несомненный интерес для мюонной и ядерной физики ввиду специфичности условий протекания ядерных реакций.

3. Исследование ряда μ -атомных процессов близко примыкает к изучению слабого взаимодействия мюона с нуклонами. Вероятность основного процесса слабого взаимодействия с нуклонами — захвата мюона протоном — сильно зависит от ряда предшествующих ему стадий — μ -атомных и μ -молекулярных процессов. Такие фундаментальные (но пока еще только планируемые) опыты по проверке квантовой электродинамики, как измерение лембовского сдвига, энергии сверхтонкой структуры в μ -атоме водорода, невозможны без детального знания взаимодействий μ -атомов с веществом.

К началу наших исследований (1959 г.) теория μ -атомных процессов в водороде была развита довольно полно^{14/}. Что же касается экспериментов, то они относились только к сравнительно узкому кругу вопросов, а именно, к наблюдению ядерных реакций синтеза из состояния $p\mu$ -молекулы.

В связи с актуальностью проблем на синхротроне ОИЯИ был выполнен цикл исследований, ставивших своей целью:

1. Изучение процессов рассеяния $p\mu$ - и $d\mu$ -атомов в водороде.
2. Измерение константы реакции перехода мюона от $p\mu$ -атома к дейтронам.
3. Получение сведений о скоростях образования мюонных молекул $pp\mu$, $p\mu d$, $dd\mu$.
4. Исследование относительных выходов ядерных реакций, вызываемых мюонами в дейтерии.
5. Измерение скоростей и исследование механизма перехода мюона от μ -атомов водорода к другим ядрам.

II

В главе I диссертации дается краткая характеристика процессов, в которых участвует отрицательный мюон после его замедления в водороде; рассматриваются особенности расчета μ -молекулярных систем и приведены результаты экспериментов, имевшиеся к началу наших работ. Здесь также введены основные обозначения, используемые в дальнейшем в тексте. Схема основных процессов приведена на рис. 1.

В главе II описывается методика исследований и экспериментальная аппаратура.

Эксперименты производились с помощью диффузионной камеры, помещенной в магнитное поле и работавшей в интервале давлений водорода или дейтерия $5 \div 23$ атм. Часть опытов, а именно, измерение абсолютной скорости перехода мюона от водорода к ядрам других элементов, выполнена методами электроники на установке, состоящей

из газовой мишени и системы спинтиллиационных счетчиков.

Диффузионная камера в магнитном поле, предназначенная для работы с легкими газами (H_2 , D_2 и He) при давлениях до 25 атм была сконструирована и построена в 1955-1957 гг.^{15/} Ранее на этой камере был выполнен цикл работ по исследованию процессов рассеяния π^- -мезонов на водороде и гелии, а также по изучению редких распадов π^- -мезонов.

В диссертации описаны основные конструктивные особенности камеры. Камера, с диаметром рабочей области 380 мм, была помещена в постоянное магнитное поле напряженностью около 7 кэрстед. Для снижения плотности паров спирта она работала в режиме сравнительно низкой температуры спиртового желоба ($T = 0^\circ C$), и при этом средний градиент температуры в чувствительной области был равен $5 \div 6^\circ C/cm$. В зависимости от выбранных условий наполнения высота чувствительного слоя составляла $40 \div 60$ мм. В качестве испаряющейся жидкости использовался либо метиловый, либо нормальный пропиловый спирт. В последнем случае из-за низкого давления насыщенного пара в рабочей области температур ($-70^\circ C \pm 0^\circ C$) плотность атомов углерода и кислорода была примерно в 5 раз ниже, чем при использовании метилового спирта (соответствующие концентрации в водороде при давлении 23 атм составляли примерно 10^{-3} и $2 \cdot 10^{-4}$).

В части опытов камера работала с низким давлением водорода, составлявшим 5 атм. При этом для достижения лучших условий оказывается предпочтительным применение более тяжелого спирта.

В опытах использовался дейтерий, специально очищавшийся от трития. Примесь трития составляла $T/D = 5 \cdot 10^{-14}$. Указанная примесь трития приводит к заметному капельному фону, особенно при больших давлениях дейтерия. Ввиду малого размера капель ($0,1 \div 1$ мм), образуемых электронами распада, и размытия этих капель из-за диффузии, этот фон практически не был важен для идентификации и обработки событий. Газ собирался в исходные баллоны с помощью двухступенчатого мембранного компрессора.

Камера экспонировалась в пучке π^- - и μ^- -мезонов с начальным импульсом 260 Мэв/С. Торможение мюонов и поглощение пионов осуществлялось медным фильтром. Плотность остановок мюонов в водороде с давлением 23 атм составляла одну остановку на 4,5 кадра при 15 пиклах ускорения на фотографируемый импульс. Примесь пионных остановок составляла 3% - 4%, и фон проходящих через камеру частиц был $7 \div 10$ частиц на кадр.

Обработка стереофотографий производилась координатным и репроекционным методами. Основные проведенные экспозиции камеры можно разделить на четыре главные серии. Серия Н включает экспозиции камеры с водородом и естественной примесью дейтерия. Серия опытов НД выполнена с водородом и сравнительно низкими концентрациями дейтерия. В серии Д камера работала с почти чистым дейтерием. И, наконец, в

NZ - серия использовался водород с примесью Z -атомов углерода и кислорода 2%.

Во всем цикле опытов по изучению μ -атомных процессов, проводившихся в течение нескольких лет, было получено около 500000 стереофотографий.

В конце II главы описана установка, использовавшаяся для определения абсолютных скоростей перехода мюона от мезоводорода к другим элементам. Установка включает тонкостенную газовую мишень и два телескопа из сцинтилляционных счетчиков: один для мониторинга пучка и другой - для регистрации электронов распада от мюонов, останавливавшихся в рабочем газе. Основными элементами электроники являются быстрые схемы совпадений, логические схемы "ворот" и блокировок для выделения акта $\mu \rightarrow e$ -распада.

В главе III описываются исследования процессов с участием $p\mu$ -атомов. Основное внимание уделено изучению процесса рассеяния $p\mu$ -атомов на протонах:



Метод измерения сечения рассеяния был основан на измерении диффузионной длины $p\mu$ -атома. Диффузия образующихся в газе μ -атомов приводит к тому, что в части случаев $\mu \rightarrow e$ -распадов начало следа электрона распада смещено относительно точки останова мюона. Полученные распределения случаев по длине "пробега" $p\mu$ -атомов в опытах серии N приведены на рис. 2.

По выходу звезд с видимыми лучами от захвата мюона ядрами C и O измерено также время жизни $p\mu$ -атома. Проведен анализ полученных данных при нескольких предположениях о распределении μ -атомов по спиновым состояниям.

Далее приводится описание опыта по измерению скорости обменной реакции



в котором водород разбавлялся дейтерием в концентрации $C_D / C_H = 0,5\%$.

Идентификация реакции (2) осуществляется сравнительно легко ввиду того, что образующийся $d\mu$ -атом уходит от точки своего образования на значительное расстояние (≈ 10 мм).

Глава IV посвящена изучению кинетики взаимодействия $d\mu$ -атомов с водородом, дейтерием и сложными ядрами. Измерение сечений рассеяния $d\mu$ -атомов, так же как и для $p\mu$ -атомов, было основано на анализе распределений по длинам пробегов $d\mu$ -атомов, полученных в серии опытов (НД), в которых варьировались концентрация дейтерия в водороде и концентрация C-и O-атомов. Примеры распределений приведены на рис. 3.

Для определения сечений упругого рассеяния $d\mu$ -атомов был развит способ, основанный на сравнении экспериментально найденных распределений по пробегам с рассчитанными методом Монте-Карло посредством χ^2 -анализа.

В главе V описываются исследования катализа отрицательными мюонами ядерных реакций в газообразном водороде. Были измерены выходы следующих реакций



а также оценены вероятности "прилипания" мюона к протону, ядрам трития и гелия-3 в реакциях (5,6). Идентификация реакции (4) производилась по измерению импульса мюона конверсии (рис. 4), а реакций (5) и (6) - по измерению пробегов заряженных частиц, наличию электрона распада в точке взаимодействия и углу разлета частиц (рис. 5, 6). Полученные данные интерпретируются с точки зрения механизма, а также скоростей образования μ -молекул и ядерных реакций.

Глава VI посвящена исследованию процесса перехода мюона от водорода к ядрам других элементов:



Здесь обобщены данные, полученные на диффузионной камере: по определению выхода медленных электронов Оже (с энергией несколько кэв) в процессах перехода (7) и (8), по измерению выхода звезд и множественности лучей в звезде, а также по определению соотношения скоростей реакции (7) и (8). Далее приводятся результаты измерений абсолютных скоростей перехода мюона к кислороду, аргону и ксенону, полученные с помощью электронной методики. Обсуждается механизм перехода.

III

Результаты и выводы

1. Для изучения μ -атомных (и некоторых пионных) процессов создана диффузионная камера высокого давления в магнитном поле с рабочим диаметром 380 мм. Найден режимы работы камеры в условиях низкой плотности паров спирта и при низких давлениях водорода. В опытах с мюонами использовался дейтерий, очищенный от

третия до концентрации $5 \cdot 10^{-14}$. В цикле работ по исследованию с помощью диффузионной камеры μ -атомных процессов было получено и обработано около 500000 стерео-фотографий. Для исследования ряда μ -атомных явлений методами электроники создана установка с газовой мишенью и системой сцинтилляционных счетчиков.

2. Впервые наблюдалось явление диффузии нейтральных μ -атомов водорода и измерены распределения по пробегам $p\mu$ -атомов при разных давлениях водорода. На основе этих распределений найдено, что сечение рассеяния $p\mu$ -атомов на протонах в диффузионном приближении равно $(1,21 \pm 0,17) \cdot 10^{-18} \text{ см}^2$, а с учетом начальной энергии $p\mu$ -атома $\approx 1 \text{ эв} - (1,73 \pm 0,18) \cdot 10^{-18} \text{ см}^2$.

Проведен анализ результатов на основе известных теоретических выражений для сечений рассеяния в различных спиновых состояниях $p\mu$ -атома. Найдено, что наиболее вероятным значением скорости перехода из триплетного состояния в синглетное является величина $\approx 10^{10} \text{ сек}^{-1} x/$, а сечение упругого рассеяния $p\mu$ -атомов, находящихся в нижнем состоянии сверхтонкой структуры, на протонах равно

$\sigma_0 = (1,87 \pm 0,30) \cdot 10^{-19} \text{ см}^2$. Экспериментальные данные по рассеянию $p\mu$ -атомов на протонах подтверждают наличие в системе $p\mu$ виртуального уровня с малой энергией связи, на существование которого впервые было указано Зельдовичем и Герштейном.^{/14/}

3. В серии опытов, в которых менялась концентрация дейтерия в водороде, а также концентрация атомов углерода и кислорода, измерены распределения по пробегам $d\mu$ -атомов, образующихся в процессе изотопного обмена. Полученные величины упругого рассеяния $d\mu$ -атомов равны:

$$\begin{aligned} \sigma_{d\mu+d} &= (4,15 \pm 0,29) \cdot 10^{-18} \text{ см}^2; \\ \sigma_{d\mu+p} &= (0,8 \pm 0,8) \cdot 10^{-21} \text{ см}^2; \\ \sigma_{d\mu+z} &= (1,2 \pm 0,5) \cdot 10^{-18} \text{ см}^2. \end{aligned}$$

Найденные величины находятся в согласии с теорией^{/14,15/}. В частности, малая величина сечения рассеяния $d\mu$ -атомов на протонах указывает на наличие эффекта Рамзауэра-Таунсенда в μ -атомных столкновениях.

4. Впервые измерена абсолютная скорость перехода мюона от водорода к дейтерию, $\Lambda_e = (1,2 \pm 0,3) \cdot 10^{10} \text{ сек}^{-1}$. Из измеренной величины Λ_e и известного из данных в жидком водороде отношения $\Lambda_e / \lambda_0 + \Lambda_{pp\mu}$ найдена скорость образования $pp\mu$ -молекул,

$$\Lambda_{pp\mu} = (1,5 \pm 0,8) \cdot 10^6 \text{ сек}^{-1}.$$

^{x/} Все скорости неупругих процессов приведены к плотности водорода или дейтерия $N = 4,28 \text{ см}^3$ (плотность жидкого водорода).

5. В опытах с различной плотностью дейтерия измерен выход реакции $d\mu + d \rightarrow t + p + \mu^-$. Средний выход этой реакции, приведенный к плотности дейтерия 23 атм, составляет $(2,4 \pm 0,4) \cdot 10^{-2}$. Впервые зарегистрирована ядерная реакция синтеза $d\mu + d \rightarrow \text{He}^3 + n + \mu^-$. Измерено отношение двух основных каналов реакции синтеза двух дейтронов:

$$\frac{Y_{\text{He}}(dd\mu + \text{He}^3 + n + \mu^-)}{Y_p(dd\mu + t + p + \mu^-)} = 1,20 \pm 0,37.$$

Получены оценки вероятностей посадки мюона в $d+d$ -реакциях на ядра гелия-3, трития, водорода. С 90%-ной достоверностью найдено, что

$$W(\text{He } \mu) = \frac{Y_{\text{He}\mu}(dd)}{Y_{\text{He}}(dd)} < 0,13;$$

$$W(t\mu) = \frac{Y_{t\mu}(dd)}{Y_p(dd)} < 0,14;$$

$$W(p\mu) = \frac{Y_{p\mu}(dd)}{Y_p(dd)} < 0,13.$$

Впервые измерена скорость образования $dd\mu$ -молекул:

$$\Lambda_{dd\mu} = (0,78 \pm 0,11) \cdot 10^8 \text{ сек}^{-1}.$$

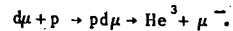
Найденное значение скорости образования $dd\mu$ -молекул почти в 20 раз превышает теоретическое значение, вычисленное в предположении обычного механизма образования μ -молекул путем электрического дипольного перехода, а выход реакции $d\mu + d \rightarrow t + p + \mu^-$ примерно в 10 раз превышает выход, ожидаемый на основании данных, полученных в жидком дейтерии^{/16,17/}.

Возможной причиной, обуславливающей большой наблюдаемый выход реакций слияния двух дейтронов в условиях наших опытов, является резонансная зависимость сечений образования $dd\mu$ -молекул и ядерной реакции на лету от энергии $d\mu$ -атома (рис. 7). Такая зависимость возникает из-за наличия у системы $dd\mu$ -уровней с энергией, близкой к нулю, и может качественно объяснить различие в выходах реакций синтеза в газообразном и жидком дейтерии.

Как показывает анализ, теоретический вывод о том, что вероятность ядерных реакций в $dd\mu$ -молекуле близка к 1, не противоречит всем имеющимся в настоящее

время экспериментальным результатам.

6. В опытах, проводившихся в газообразном водороде (23 атм) с концентрацией дейтерия 6%, измерен выход реакции



Этот выход, экстраполированный к концентрации Z -атомов, равной нулю, составляет $Y_{\mu}^{\circ}(pd) = (3,6 \pm 0,9) \cdot 10^{-3}$. Найденная с учетом этого выхода скорость образования $p d\mu$ -молекул

$$\Lambda_{p d\mu} = (1,8 \pm 0,6) \cdot 10^8 \text{ сек}^{-1}, \text{ а скорость ядерной реакции}$$

$$\lambda_F(pd) = (0,6 \pm 0,3) \cdot 10^8 \text{ сек}^{-1}. \text{ Отношение измеренного нами выхода реакции к выходу,}$$

ожидаемому из результатов экспериментов в жидком водороде, равно $0,37 \pm 0,12$. Это различие, возможно, связано с уменьшением сечения образования $p d\mu$ -молекул в газообразном водороде из-за эффекта плотности. Данные настоящей работы согласуются с установленным в работе группы Ледермана /18/ фактом, что скорость ядерной реакции $\lambda_F(pd) < \Lambda_{p d\mu}$.

7. Впервые получены количественные данные о скорости перехода мюона с K -орбиты μ -атома водорода к ядрам других элементов и исследован механизм перехода.

Измерены абсолютные скорости перехода от μ -атома к углероду, аргону и ксенону:

$$\Lambda_c^p = (5,1 \pm 1,0) \cdot 10^{10} \text{ сек}^{-1};$$

$$\Lambda_A^p = (12,1 \pm 1,8) \cdot 10^{10} \text{ сек}^{-1};$$

$$\Lambda_{Xe}^p = (44,6 \pm 3,5) \cdot 10^{10} \text{ сек}^{-1}.$$

Полученные значения Λ_Z^p хорошо аппроксимируются зависимостью $\Lambda_Z^p = Z$ (рис. 8).

Найдено, что отношение скоростей перехода к углероду и кислороду от $p\mu$ - и $d\mu$ -атомов равно $\lambda_Z^d / \lambda_Z^p = 2,0 \pm 0,7$.

Впервые в процессах образования $Z\mu$ -атомов наблюдалось появление медленных электронов Оже (с энергией несколько кэВ). Выход электронов Оже на один акт образования в процессе перехода μ -атомов углерода и кислорода составляет $0,83 \pm 0,05$. Частота появления и энергия оже-электронов свидетельствует о том, что переход осуществляется преимущественно на высокие μ -атомные уровни ядра с главным квантовым числом $n=Z$. Показано, что вероятность безрадиационного перехода мюона от $p\mu$ -атомов непосредственно в основное состояние $C\mu$ - и $O\mu$ -атомов меньше 3%.

Полученные результаты вместе с фактом подавления перехода к геллию, установленным в других работах, хорошо интерпретируются на основе механизма пересечения μ -молекулярных термов, предложенного Герштейном /19/.

Л и т е р а т у р а

1. Ю.А. Будагов, С. Виктор, В.П. Джелепов, П.Ф. Ермолов, В.И. Москалев. Материалы совещания по камерам Вильсона, диффузионным и пузырьковым камерам. Выпуск II. Дубна, 1958, Препринт ОИЯИ Р - 230; ЖЭТФ, 38, 734 (1960).
2. В.П. Джелепов, П.Ф. Ермолов, Е.А. Куширенко, В.И. Москалев, С.С. Герштейн. Препринт ОИЯИ, Д-812, Дубна, 1961; ЖЭТФ, 42, 439 (1962); Nucl. Phys., 34, 424(1962).
3. V.P.Dzheleпов, M.Friml, S.S.Gerstein, Yu.V.Katyshev, V.I.Moskalev, P.F.Yermolov. Proc. of 1962 Int. Conf. on High-Energy Physics at CERN, p.484.
4. В.П. Джелепов, П.Ф. Ермолов, Ю.В. Катышев, В.И. Москалев, В.В. Фильченков, М. Фримл. ЖЭТФ, 48, 2042 (1964); Nuovo Cim., 33, 40 (1964).
5. В.П. Джелепов, П.Ф. Ермолов, В.И. Москалев, В.В. Фильченков, М. Фримл. ЖЭТФ, 47, 1243 (1964).
6. В.П. Джелепов, П.Ф. Ермолов, В.В. Фильченков. ЖЭТФ, 49, 393 (1965).
7. С.Г. Басиладзе, П.Ф. Ермолов, К.О. Оганесян. ЖЭТФ, 49, 1042 (1965).
8. В.П. Джелепов, П.Ф. Ермолов, В.И. Москалев, В.В. Фильченков. Препринт ОИЯИ, Р-2356, Дубна, 1965; ЖЭТФ (в печати).
9. V.P.Dzheleпов and P.F.Yermolov. Proc. of Int. Conf. on Nucl. Phys., Paris, 1964, p.1084.
10. В.П. Джелепов, П.Ф.Ермолов, В.И. Москалев, В.В. Фильченков, М. Фримл. Труды XII международной конференции по физике высоких энергий. Том 1, стр. 878. Атомиздат, М., 1965.
11. S.G.Basiladze, V.P.Dzheleпов, V.V.Filchenkov, K.O.Oganesyаn, P.F.Yermolov. Proc. of Int. Conf. on Elementary Particles, Oxford, 1965.
12. L.Alvarez et al. Phys. Rev., 105, 1127 (1957).
13. F.G.Frank. Natura, 160, 525 (1947); А.Д. Сахаров. См. /14/, Я.Б. Зельдович. ДАН, 95, 493 (1954).
14. Я.Б. Зельдович, С.С. Герштейн. УФН, 71, 581 (1960).
15. S.Cohen, D.L.Yudd, R.Y.Riddel. Phys. Rev., 119, 397 (1960).
16. J.Fetkovich et al., Phys. Rev. Lett., 4, 570 (1960).
17. J.Doede. Phys. Rev., 132, 1782 (1963).
18. E.Y.Blessler, E.W.Anderson, L.M.Lederman, S.L.Meyer, J.L.Rosen, J.E.Rothberg and I.T.Wang. Phys. Rev., 132, 2679 (1963).
20. С.С. Герштейн, ЖЭТФ, 43, 706 (1962).

Рукопись поступила в издательский отдел
1 июня 1968 г.

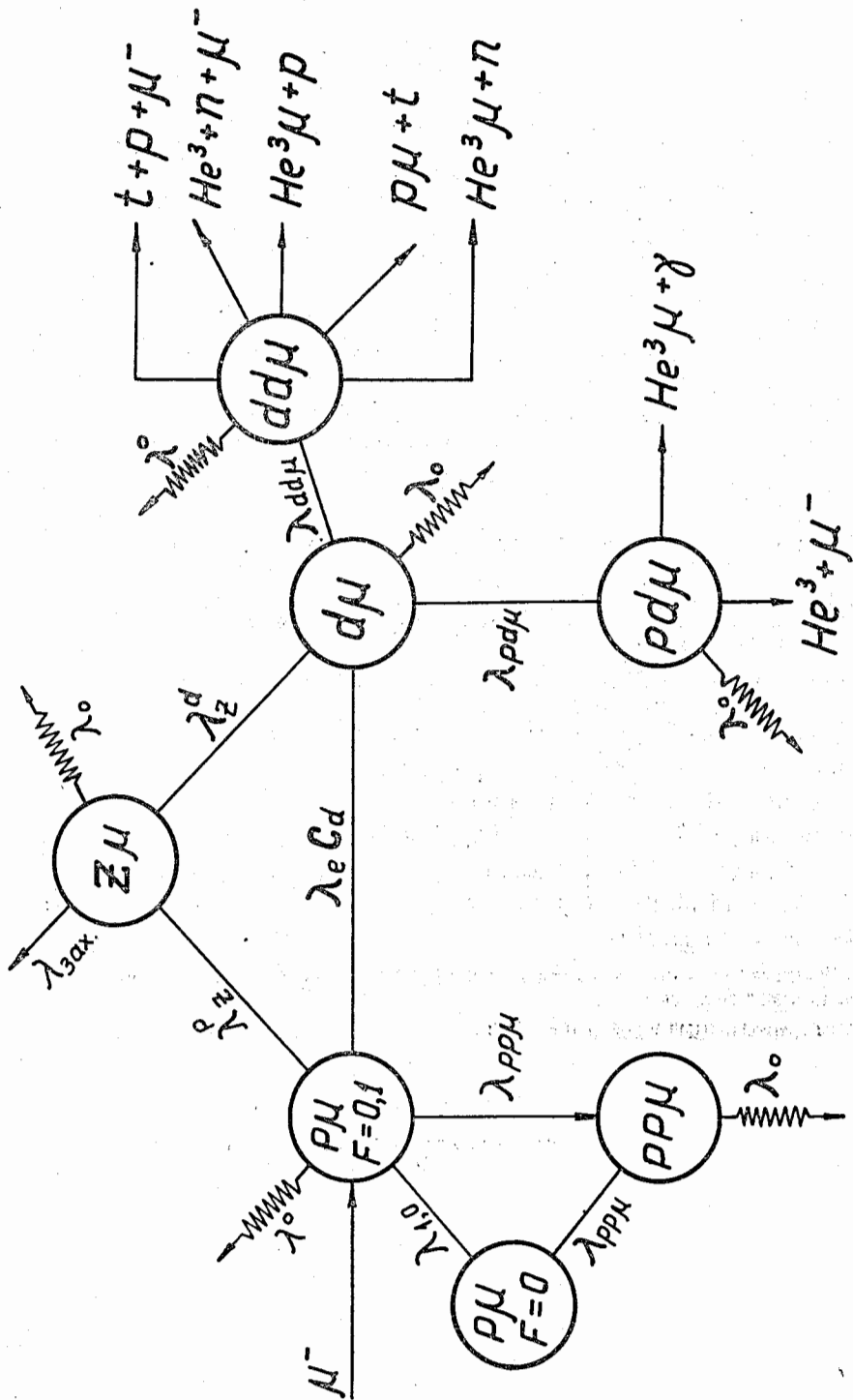


Рис. 1. Схема основных μ -атомных процессов и ядерных реакций синтеза, вызываемых отрицательными мюонами в водороде.

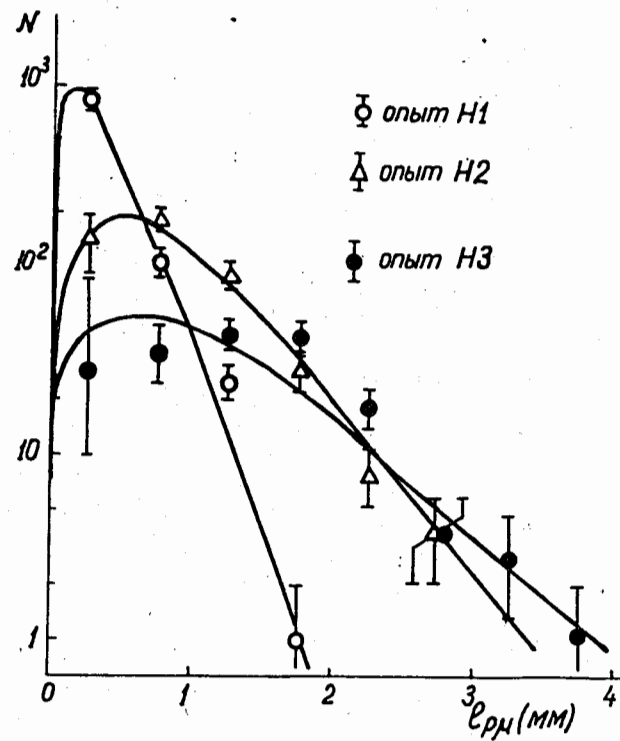


Рис. 2. Экспериментальные распределения случаев по длинам пробегов $p\mu$ -атомов в опытах с водородом Н1 ($P_H = 23$ атм, $C_Z = 0,12\%$), Н2 ($P_H = 4,8$ атм, $C_Z = 0,80\%$) и Н3 ($P_H = 4,6$ атм, $C_Z = 0,12\%$). Сплошные кривые рассчитаны методом Монте-Карло.

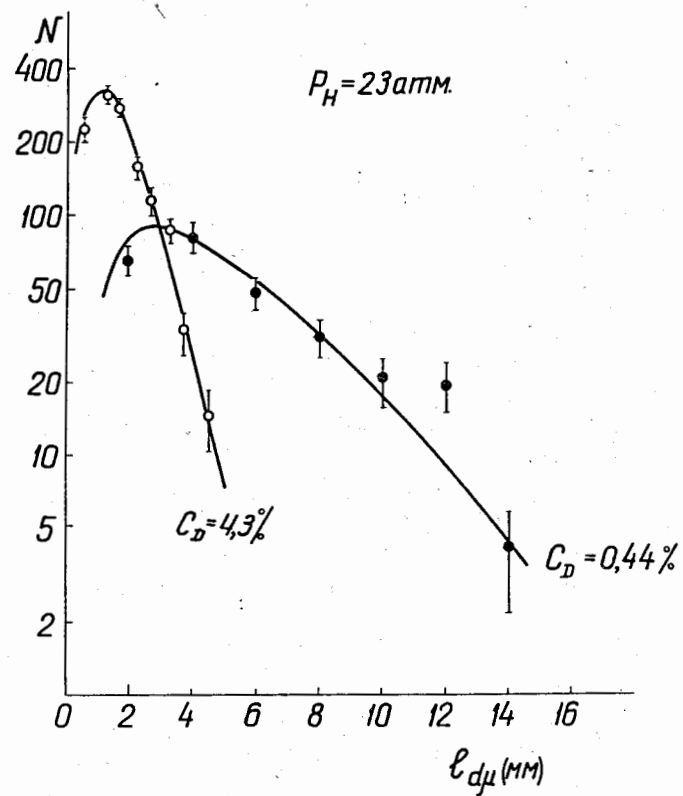


Рис. 3. Примеры экспериментальных распределений случаев по длинам пробегов $d\mu$ - атомов в опытах с водородом и малой концентрацией дейтерия.

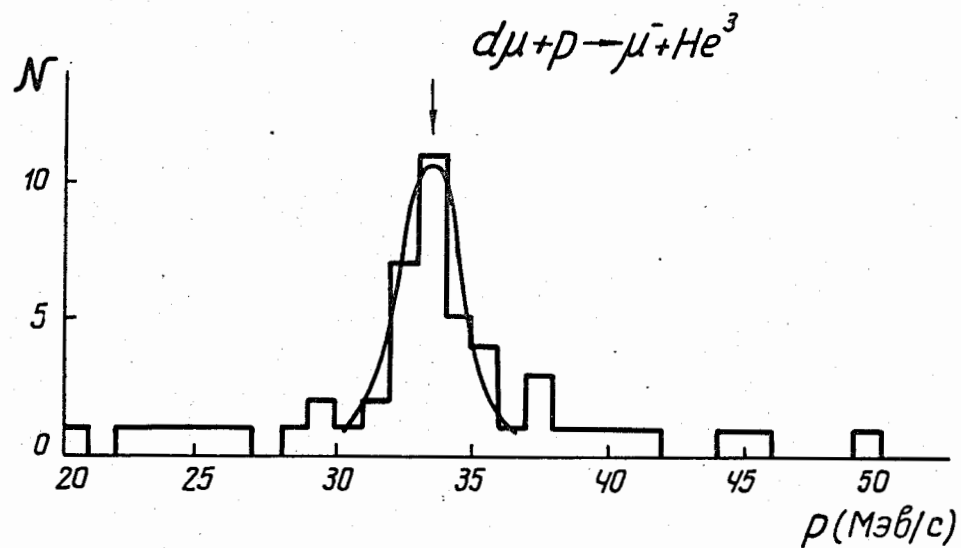


Рис. 4. Импульсный спектр мюонов конверсии в реакции $d\mu + p \rightarrow p d\mu \rightarrow \text{He}^3 + \mu^-$.

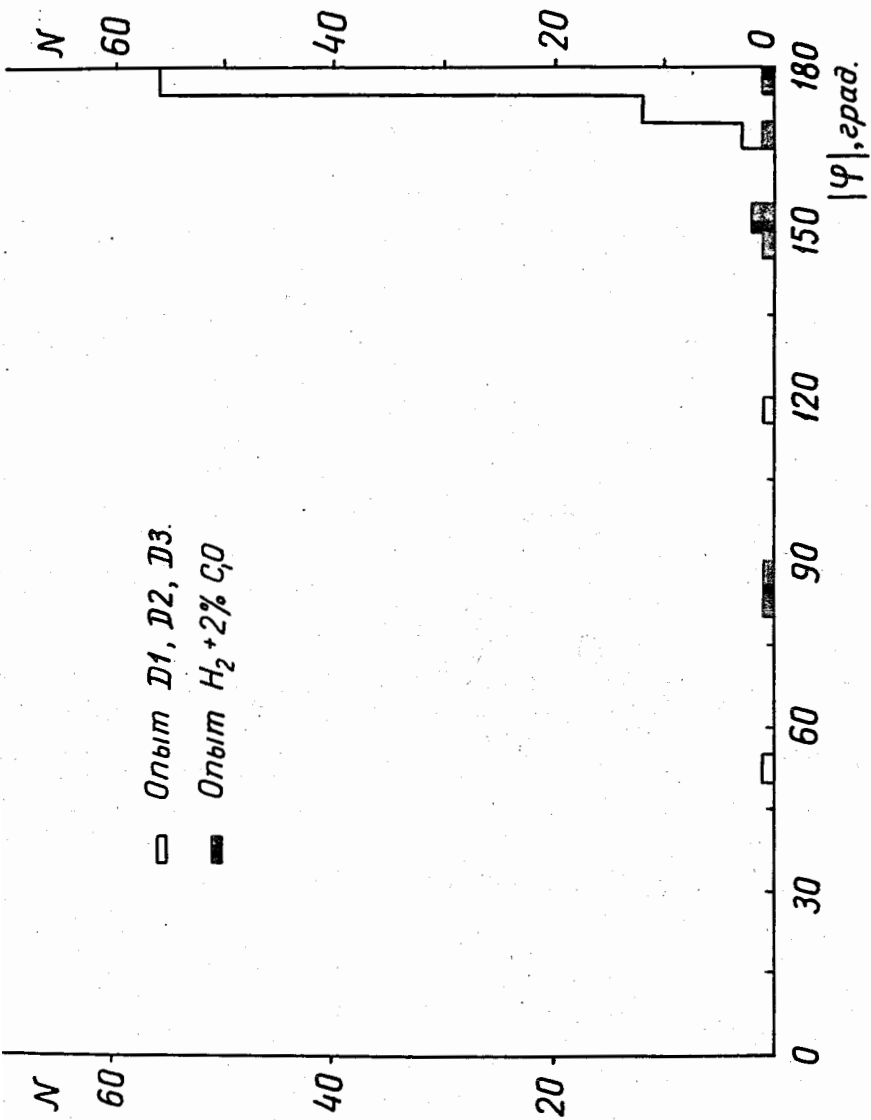


Рис. 5. Распределение по углу разлета вторичных частиц ϕ в 2-лучевых звездах; пик в области углов $\phi = 180^\circ$ относится к случаям реакции $d\mu + d \rightarrow dd\mu \rightarrow t + p + \mu^-$.

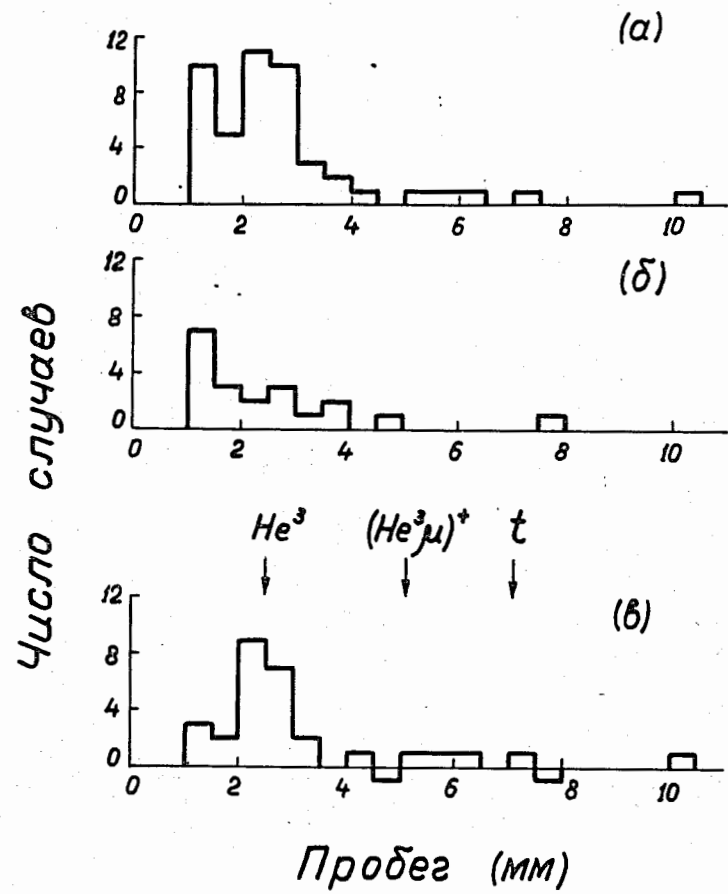


Рис. 6. Распределения случаев по пробегам однолучевых звезд в опытах с дейтерием при давлении 7 атм (а) и с водородом при давлении 5 атм (б). На рис. (в) приведена разность числа случаев в этих опытах. Пик в области пробегов 2,5 мм относится к случаям реакции $d\mu + d \rightarrow dd\mu \rightarrow He^3 + n + \mu^-$.

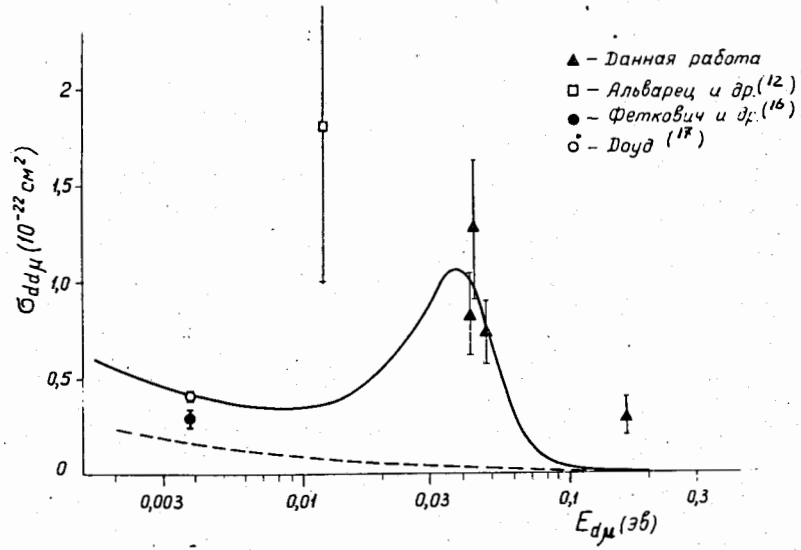


Рис. 7. Зависимость $\sigma_{dd\mu}$ (суммарного сечения образования $dd\mu$ -молекул и сечения ядерной реакции на ленту) от относительной энергии $d\mu$ -атома. Сплошная кривая - расчет по формуле Брейта-Вигнера, пунктирная - закон $1/\sqrt{E}$, нормированный на теоретическое значение $\Lambda_{dd\mu} = 0,04 \cdot 10^8$ сек⁻¹.

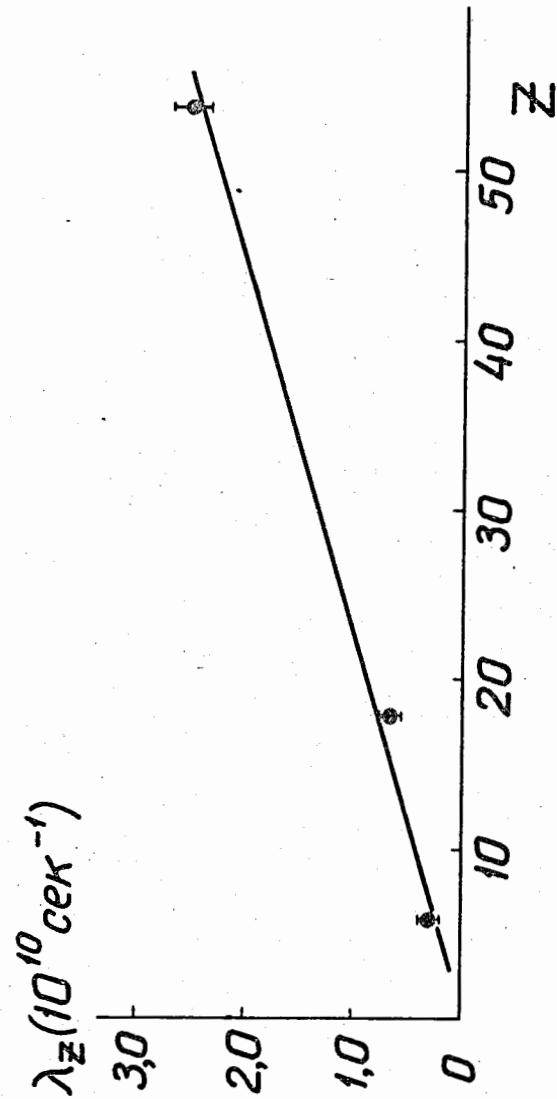


Рис. 8. Зависимость скорости перехода $\mu + Z \rightarrow Z\mu + p$ от заряда ядра Z в водороде при давлении 44,2 атм.